

变化环境下中国水安全问题研究与展望

夏军^{1, 2, 3}, 石卫^{1, 2, 3}

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 武汉大学 水安全研究院, 湖北 武汉 430072; 3. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430072)

摘要: 变化环境下水安全问题是国际上关注的热点, 也是保障我国水安全战略和实现可持续发展面临的重大挑战性问题。本文归纳总结了国内外有关水安全的定义; 针对全球变化影响下我国面临的水安全问题, 综述了变化环境下水安全问题研究最新的进展, 包括水资源安全的评价研究和气候变化背景下水安全研究与实践的新进展, 强调了水安全保障的水文水资源及其与社会科学的交叉应用基础研究, 提出了水与人类未来发展的水安全保障的若干对策与建议。

关键词: 水安全; 气候变化; 展望; 挑战; 机遇

中图分类号: X24

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20150937

1 水安全的概念与内涵

水安全, 是指一个国家或地区乃至全球人类生存发展所需的有量与质保障的水资源、能够可持续维系流域中人与生态环境健康、确保人民生命财产免受水旱灾害与水环境污染等损失的能力。水安全的概念比较广泛, 它涉及到人们通常熟知的供水安全、防洪安全、水质安全、水生态安全、跨境河流及国家安全等多个方面。水安全具有空间地域性、全局性和可控性, 通过对水安全系统各因素的调控与治理, 可改变水安全程度。所以水安全是一个动态的概念, 尤其随着全球气候变化的影响愈来愈显著, 原来的水安全问题会发生明显的变化。科学技术和社会发展水平变化也会使水安全保障程度不同。变化环境下水安全问题已成为人类可持续发展面临的新的重大挑战。

水安全问题的研究起步于20世纪70年代, 在最近十几年中来自包括政策和学术等不同领域的研究者们开展了水安全问题相关研究。到目前为止, 关于水安全没有一个明确、被广泛认可的定义。Cook等^[1]强调根据人类和环境不同的需求水安全有不同的定义。许多国际组织提出了各自的水安全定义, 如全球水组织和世界经济论坛^[2-3]。水安全的定义最早出现在2000年Stockholm水会议上, 属于非传统安全范畴, 通常指针对人类社会生存环境和经济发展过程中发生的与水有关的危害问题^[4]。2000年的“21世纪水安全”海牙部长级宣言指出: 水安全意味着确保淡水、海岸和相关的生态系统得到保护和改善, 确保可持续性发展和政治稳定得到加强, 确保人人都能够以可承受的支出获得足够安全的淡水, 确保免受与水有关的灾难的侵袭。波恩国际淡水会议认为水安全是以公平的和持续的方式利用和保护世界淡水资源, 是各国政府迈向更加安全、公平和繁荣的过程中遇到的重要挑战问题, 把水安全与可持续发展以及社会公平联系起来。联合国教科文组织(UNESCO)对于水安全的定义是: 人类生存发展所需有量与质保障的水资源、能够维系流域可持续的人与生态环境健康、确保人民生命财产免受水灾害(洪水、滑坡和干旱)损失的能力^[5]。国际水文计划第八阶段研究指出, 水安全系指一国是否有能力稳定获取质量达到可接受水平的充足水源以在重要关头维持人类和生态系统健康

收稿日期: 2015-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279140, 41571028)

作者简介: 夏军(1954-), 男, 湖北孝感人, 中国科学院院士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

康，同时确保有效保护人与财产免遭与水有关的灾害——洪水、滑坡、地面沉降和干旱的侵袭。

国内许多学者从不同角度给出了水安全的定义。从水安全问题成因方面出发，水安全问题是自然原因或人类活动造成的，使得人类赖以生存的区域水循环和及其联系的水系统发生对人类不利的演进，如干旱、洪涝、水质污染等，进而引发了一系列的经济、社会和环境安全问题^[6]。还有学者从水资源的供给、可持续利用等方面考虑，如果一个区域的水资源供给不能满足其社会经济长远发展的合理要求，那么这个区域的水资源就不安全。水安全包括水灾害的可承受能力和水资源的可持续利用两方面，即一个国家或地区实际拥有的水资源能够保障该地区社会经济及生态环境可持续发展。水安全意味着有水资源的量与质及人类对水资源的利用管理活动、对人类社会的稳定与发展是有保障的，或者说存在某种程度环境影响的威胁，但是可以将其后果控制在人们可以承受的范围之内。

变化环境下水安全问题是国际上普遍关心的全球性问题，也是我国可持续发展面临的重大战略问题^[7]。水循环是联系地球系统“地圈-生物圈-大气圈”的纽带，是全球变化的核心问题之一。我国降水时空分布极为不均，水资源短缺、旱涝灾害及与水相关的生态-环境问题非常突出。过去30多年里，在全球气候变暖背景下，我国北方地区旱情加重，水生态环境恶化，南方地区极端洪涝灾害增多，严重制约了社会经济的可持续发展。未来气候变化将极有可能对我国“南涝北旱”的格局和未来水资源分布产生更为显著的影响，对我国华北和东北粮食增产工程、南水北调水资源配置工程、南方江河防洪体系规划和全国流域生态环境修复与建设等重大工程的预期效果产生不利影响。由于气候变化影响的全球和区域特性，需要从不同的国家或流域尺度开展气候变化对我国水安全问题的基础研究，它是保障我国水资源安全的重大战略需求，也是水科学前沿和应用基础问题。如图1所示为变化环境下水安全问题的内涵示意图，通常是指相对人类社会生存的变化环境和经济发展过程中发生的水的危害问题，包括供水安全、防洪安全、水环境安全、水生态安全、跨境河流及国家安全等。水安全的对立面是水短缺、水污染、水生态退化、水灾害、水管理的失衡、跨境河流水争端等水的危机。水资源、水环境、社会经济发展、国家-地区间的联系对水的需求构成了水安全体系，它们相互联系、作用，形成了复杂和时变的水安全系统。

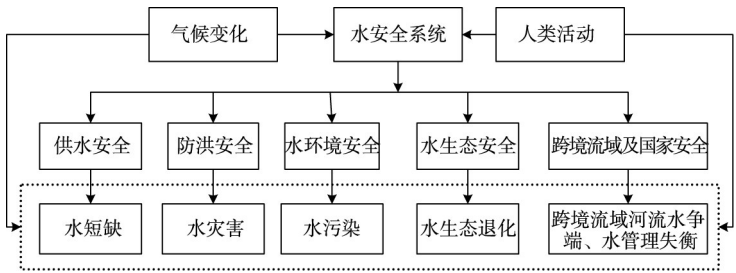


图1 变化环境下水安全问题研究内涵

2 全球和中国面临的水安全问题

水是生命之源、生产之要、生态之基。水安全不仅是资源安全的重要组成部分，也关系着国家的粮食安全、能源安全、生态安全、国土安全等其他安全，是国家安全一个重要的方面。

从全球水安全态势看，在全球气候变化影响愈来愈加剧的背景下，目前全球有11亿人缺乏足够的生活用水，26亿人无法保证用水卫生，到2050年缺少饮用水的人将可能达到20亿之多。在水资源紧缺的中东、中亚等敏感地区，水安全问题已经引起社会危机和政治危机，直接影响区域安全和稳定^[8-9]。2009—2013年期间，笔者特邀参与的全球11位知名专家组成的水战略智库，提交了全球水安全评估报告，并以专著“水与人类未来：再论水安全(Water and the Future of Humanity: Revisiting Water Security)”在Springer正式出版^[10]。从全球气候变化影响和不断增加的全球水的压力看，当今全球总的可更新用水量面临巨大压力，其中压力大于20 %区域占到全球总区域1/2，大于50 %压力的约占1/3^[10]；

占全球总人口 36 % 的 25 亿人口、世界粮食产量的 40 % 和全球 1/4 经济总量均面临水利用不可持续的重大风险(图 2(a)); 展望未来到 2050 年, 在空前规模城镇化浪潮冲击下, 全球城市化总人口的比率预计将从目前全球平均的 50 % 迅速增加到 2050 年的 70 %。全球可利用的水资源总量面临的压力变化为: 压力大于 20 % 以上区域将从现状的 50 % 增加到 65 %, 大于 50 % 压力从现状的 30 % 增加到 50 %^[10]; 全球 90 亿人口中的 52 % 将面临高风险水资源危机的压力, 全球经济总量中 45 % 的 GDP 将面临高风险的水危机压力^[10]; 25 % GDP 将面临中等水危机风险(图 2(b)), 其中包括了全球人口大国的中国。

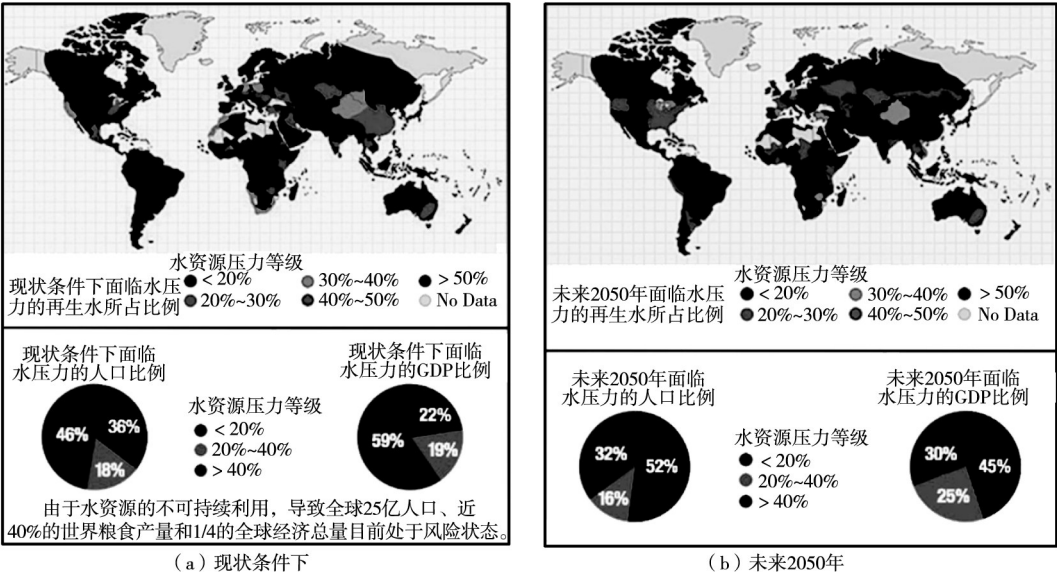


图 2 全球水资源压力变化示意图^[10]

面对全球和中国的变化环境下水安全问题，过去研究和应用中气候变化影响的后果与适应性对策不太重视。据气候变化政府间工作委员会(IPCC)最新的研究，自从工业革命以来，大气中不断增加的温室气体引起了以全球变暖为主要特征的气候变化。观测资料表明：全球平均气温在 20 世纪约升高 0.6 °C，预计未来气温将进一步升高^[11]。全球气温变暖将通过影响降雨、蒸发、径流、土壤湿度等改变全球水文循环的现状，引起水资源在时间和空间上的重新分配，加剧某些地区的洪涝和干旱灾害，引起可利用水资源的改变，进一步影响地球的生态环境和人类社会的经济发展^[12]。

尽管人们意识到气候变化对水安全有重要影响，但是作为科学问题真正被高度重视开展气候变化与水循环的观测与研究，还是从 20 世纪 80 年代开始，其中包括执行一系列全球研究和评估计划：全球能量和水循环试验(GEWEX)、国际地圈生物圈计划(IGBP)中“水文循环的生物圈方面(IBAHC)”、联合国教科文组织国际水文计划(UNESCO-IHP)、全球水系统计划(GWSP)以及国际上具有重要影响的“政府间气候变化专门委员会”最新技术报告。另外，IPCC“气候变化与水”的技术报告、DWC(Dialogue on Water and Climate)研讨会报告、联合国环境规划署(UNEP)组织编写的“全球国际水资源评估”报告等都提出了以加强区域和流域尺度的气候变化对水安全影响研究，减缓全球及区域气候变化对水安全的不利影响。气候变化对水资源系统的不利影响，会加重其它胁迫的水安全影响，如人口增长，经济活动改变、土地利用变化带来的水的供需矛盾和水污染问题等；现有水管理行为可能不足以应对气候变化给水安全带来的影响，表现在水供给可靠性、食物安全风险、人类健康、农业用水安全、能源安全和水生态系统安全；气候变化挑战传统水文稳态的假定，即过去的水文经验应用到未来的状况，水文统计特征很可能会发生变化。气候变化的负面影响将可能导致更多的水旱灾害、水短缺和水环境恶化的风险，引发严重的水安全危机^[13]。

中国是水问题最为突出的发展中国家，人均水资源量只有世界人均水平的 1/4，且时空分布极不均匀，在气候变化影响背景下，随着社会经济的快速发展和水环境恶化日益加重，中国安全问题十分严峻。突出表现在以下几个方面。

(1)人均水资源量少、水资源空间分布不平衡，供需矛盾突出。我国人均水资源占有量约占世界人均水平 1/4，全球 192 个国家排 127 位。长江以北水系流域面积占全国国土面积的 64 %，而水资源量仅占 19 %。当前我国年缺水量 530 多亿 m³，其中国民经济缺水 400 余亿 m³，挤占河道内的生态用水 130 多亿 m³。

(2)当前和未来水污染问题依然很严重。三分之二的地表水明显污染，一半以上地下水水质较差甚至极差，根据 2014 年《中国环境状况公报》可知，全国重点湖泊(水库)地表水水质达到 I 类和 II 类共计占比为 29 %，V 类和劣 V 类共计占比为 14.5 %；根据环保部 2014 年全国 423 条主要河流、62 座重点湖泊(水库)的 968 个国控地表水监测断面(点位)的水质监测结果，仅有 33.8 % 符合集中式供水水源水质要求，9.2 % 已完全丧失使用功能。

(3)中小河流山洪灾害与城市内涝问题突出。目前我国中小河流山洪灾害损失超过全国水灾害损失的 2/3，近三年 60 % 以上的城市发生过内涝灾害。根据《全国山洪灾害防治规划》的相关统计，我国流域面积在 100km² 以上的山丘区河流约有 5 万条，其中约有 70 % 经常发生山洪灾害：山洪灾害防治区横跨我国东、中、西部三大区域，共涉及 29 个省(自治区、直辖市)级、305 个地级、2058 个县级行政区。防治区内现有人口 4.6 亿，占全国总人口的 34.3 %。

(4)城市缺水与地下水过度开采仍十分严重。当前我国 655 座城市中有 400 多座城市缺水，其中 100 多座城市严重缺水。全国地下水开采量达 1100 亿 m³，造成 400 多个地下水超采区，总面积 19 万 km²。另一方面，据城建部门统计，城市自来水水厂出水中，水质不合格率达到 17 %。

(5)水生态安全形势十分严峻，据 2014 年 1 月公布的湿地资源调查结果，近 10 年来我国湿地面积减少了 339.63 万 hm²，其中自然湿地面积减少了 337.62 万 hm²，减少率达 9.33 %。河道断流、湖泊干涸、湿地退化等问题严重，影响到我国生态安全。

(6)跨境河流争端与风险加剧，我国流域跨省界河流水质管理与水的配置面临新的挑战，西南、西北、东北国际河流开发过程中不仅存在水权分配、水污染、水生态冲突、洪水灾害和“多龙治水”交织形成的复合型水问题，引发的地缘安全问题突出，未来将呈现加剧的态势。

2010 年我国第六次人口普查公布全国总人口达 13.7 亿，2050 年可能接近 16 亿。如图 3，从全球水安全分布来看，中国大部分地区处于水安全脆弱或者不安全地区。随着气候变化的影响，中国水资源的供需矛盾可能进一步加剧。与水污染、水灾害、水短缺、水生态联系的流域到跨界以及区域和国家水安全和水安全保障的问题，成为制约我国生态文明建设和可持续发展的重大战略问题。

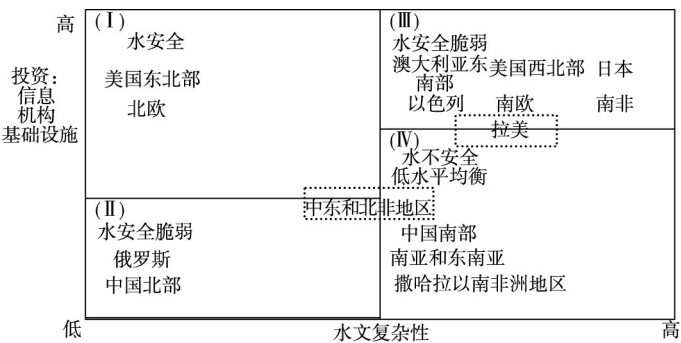


图3 水安全复杂性和投资(按国家和地区分类)^[14]

3 变化环境水安全问题及其研究的若干进展

国内外变化环境下水安全问题及其研究大体呈现出 2 个发展阶段。

3.1 水资源安全评价研究阶段 1992 年 Falkenmark 等^[15]定义人均水资源量为水资源压力指数(Water Scarcity Index, IWS)，以度量区域水资源稀缺程度，进而被广泛地应用于全球许多地区的水安全评价；Raskin 等^[16]选择了更为客观的取水量，计算取水量占可利用水资源量的比例，并将其定义为水

资源脆弱性指数(Water Resources Vulnerability Index, IWRV), 用来评价国家或地区的水安全程度; Alcamo等^[17]用年均水资源量代替水资源可利用量, 采用水资源开发利用量占年均水资源量的比例, 即水资源开发利用率指标, 评价全球尺度的水安全问题; 从水灾害和公众健康的角度来看, 美国环保署认为水安全是“阻止污染和恐怖主义, 保护水安全和国家安全”^[18]; 从人类需求的研究框架出发, Witter等^[19]认为水安全是指一种在满足水质要求有足够水量的条件下, 以实惠的价格满足人们短期和长期需求, 保障健康、安全、福利和生产的能力(家庭, 社区, 街道或国家)的状态; 从可持续发展的研究框架出发, Global Water Partnership^[2]定义水安全是指“从家庭到全球, 每个人都可以以合理的成本获得足够安全水, 过上干净、健康和满意的生活, 同时确保保护和增强自然环境”。从整体出发, Ashton^[20]提出符合国家发展目标的水量分配和优先等级策略, 避免非洲地区不同国家地区面临的水安全危机; Shiklomanov等^[21]对各国的年平均水资源可利用量和农业、工业、生活需水量进行了评估, 从水资源供给与需求之间的关系的角度进行分析水安全问题; 2003年联合国委托教育科学文化组织(UNESCO)国际水文计划(IHP)实施和完成了“世界水资源开发报告”, 呼吁加强水资源综合管理, 应对全球水危机^[22]。

我国开展针对水危机的水资源安全问题研究也比较早。除了水利部于20世纪80年代和2000年主持了2次全国水资源调查评价之外, 有关部门和科研院所也开展了相关的研究。1999年, 洪阳^[6]比较早地关注到中国21世纪的水安全问题; 夏军等^[23]指出水资源承载力是对水安全的一个基本度量, 研究水资源承载力对于认识和建设水安全保障体系具有重要意义; 2003年, 程国栋^[24]提出了与虚拟水联系的中国水资源安全战略的新思路与建议; 2006年, 畅明琦等^[25]讨论了中国水资源安全的形势。

全球和国家以及区域尺度水资源安全评价, 给维系社会经济可持续发展的水资源安全保障与管理问题提出了需求。联合国千年发展目标下的水资源可持续利用和水资源综合管理(IWRM)为水资源安全保障提供了新的目标与要求, 其中水安全研究框架如图4所示。

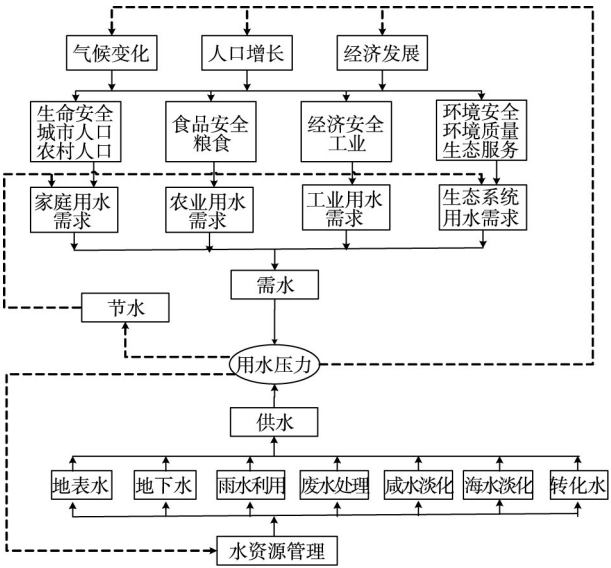


图4 水安全研究框架^[26]

3.2 变化环境下水安全研究的新阶段 20世纪80年代后, 世界气象组织(WMO)强调了气候变化对水安全影响, 推荐了一些检验和评价方法。1987年出版了关于“水资源系统对未来气候和现代气候变化的敏感性问题的总结报告。1988年, IPCC成立, 推动了气候变化影响的研究进展, 为变化环境下水安全问题研究提供了支持。第二次世界气候大会科学技术会议指出气候变化对水文水资源影响, 以及由此引发的对经济社会的影响是气候变化最重要的影响之一, 进一步认识到气候变化与水安全问题研究联系的紧密性。1992年环境与发展大会发表21世纪议程。其中指出气候变化对水文水资源的影响, 尤其是对淡水安全的影响, 是全球性应予特别关注的问题。1993年, 以气候变化、大气圈和水圈的相互作用和影响、大尺度气候和水文模拟技术为主题, 在日本召开了第六届国际气象

和大气物理学协会与第四届国际水文科学协会(LAMAPLAHS)联合大会, 水文学家们开始关注生态环境变化中土壤-植物-水的全球性研究。2001年在荷兰举行了IGBP的全球变化科学大会和第6届LAMAP-LAHS大会, 研讨全球尤其发展中国家面临的水资源安全问题。Döll等^[27]应用WaterGAP全球水文模型(WGHM)对全球水安全、食物安全和淡水生态系统安全进行评价。值得提到的是2004年由地球系统科学联盟(ESSP)框架下启动的全球水系统计划(GWSP), 其背景是在20世纪90年代国际地圈生物圈计划(IGBP)启动水文循环的生物圈方面计划(IGBP-BAHC)后, 面对全球变化的挑战, 水问题的研究已经从部分到整体、从水量-水质-水生态扩展到流域水系统综合研究。进入21世纪后, 国际地圈生物圈研究计划(IGBP)、国际全球变化人文计划(IHDP)、世界气候变化研究计划(WCRP)和国际生物多样性研究计划(DIVERSITAS)联合发起的当今地学领域最具影响的地球系统科学联盟(ESSP), 水循环及其联系的水系统是其核心和关键。2004年, ESSP特别启动了全球水系统计划(Global Water System Project, GWSP)。核心科学问题: 水系统变化的量级与机理; 水系统三大过程的作用与反馈; 水系统承载能力与调控机理。GWSP核心任务: 探知气候变化和人类影响水系统动力机制的方式, 并告知决策者如何缓解这些影响的环境与社会经济后果^[28]。

国内自20世纪80年代开始了气候变化对中国水安全影响的相关研究。1988年“中国气候与海面变化及其趋势和影响研究”作为“七五”重大项目获得国家自然科学基金委员会批准, 其中“气候变化对西北华北水资源的影响研究”是一个重要专题, 根据华北和西北地区不同的区域性特征, 采用不同的研究方法, 分别对两区气候变化对水资源的影响进行了研究, 对我国开展西北、华北水安全问题研究提供了理论技术基础; 1991年启动的“八五”国家科技攻关项目“全球气候变化的预测、影响和对策研究”中设立了“气候变化对水文水资源的影响及适应对策”专题, 开展了大规模的气候模拟和气候预测实验, 揭示了对水安全影响的若干气候异常类型的形成和演变机理, 加强了全球气候变化对水资源安全的研究; 2003年国家“十五”科技攻关重点项目“中国可持续发展信息共享系统的开发研究”中设立了“气候变化对我国淡水资源的影响阈值及综合评价”专题, 针对变化环境下中国面临的水安全问题, 利用分布式水文模型基于未来气候变化情景对未来水资源模拟及水资源的需求预测进行气候变化阈值研究, 该研究拓展了以往的研究空间范围尺度与技术手段。

2010年, 国家973重点基础研究发展规划项目专门支持了3项气候变化影响与水资源安全领域的相关研究, 取得了比较好的进展。例如, 张建云等开展了“气候变化对黄淮海地区水循环的影响机理和水安全评估”专项研究, 选择旱涝问题严重、水资源供需矛盾突出的黄淮海地区为研究对象, 探索了气候变化对水循环要素和过程影响机理, 分析气候变化对旱涝灾害的驱动机制, 并评估未来气候变化下的旱涝灾害风险和区域水安全, 该成果为区域水资源可持续利用支撑经济社会的可持续发展提供科技保障。陈亚宁等开展了“气候变化对西北干旱区水循环影响机理与水安全研究”, 以气候变化对水循环和水安全的影响为主线, 开展西北干旱区气候变化对水资源形成转化的影响及社会与生态系统的响应、西北干旱区水安全与适应性调控等研究, 该成果紧密结合国家需求, 为国家的决策提供科学支撑。夏军等开展了“气候变化对我国东部季风区陆地水循环与水安全的影响及适应对策”研究。以我国东部季风区的江河流域为重点, 建立“水文-气候”双向耦合模式, 揭示了气候变化对水循环影响与成因; 提出了基于贝叶斯理论的气候变化概率预测新途径, 减少了多模式降水预估的不确定性; 发展了与气候变化联系的非稳态极值洪水频率计算方法, 以及水资源脆弱性多元函数分析的理论与方法, 建立了脆弱性与适应性的联系, 提高了应对气候变化影响的水资源适应性管理与对策的科学性。通过项目研究, 发现了我国陆地水文循环主要变化是温室气体排放影响叠加在东部季风区显著的自然变率背景下共同作用形成的若干规律, 预估了随着未来CO₂排放贡献率逐步增大, 我国极端水旱灾害有进一步增加的态势、气温升高1℃华北农业耗水约增加4%总用水量、气候变化是水循环变化重要驱动因子等新的认识。成果应用到水利部水利水电规划设计总院、水文局和中国气象局应对气候变化影响的水资源安全对策与建议。

另外, 国内许多学者也开展了相关的研究。如张建云等^[29]从防洪安全, 供水安全、水生态环境安全和水工程安全4个方面分别阐述气候变化对中国水安全的可能影响; 矫勇^[30]分析了全球变暖对我

国洪水安全、用水安全及水生态环境安全的可能影响,并进一步阐述了在流域综合规划修编中应考虑的气候变化问题;刘昌明等^[31]阐述了气候变化对水安全的主要影响,揭示了水资源系统对气候变化响应的主要特征及其研究方法;史正涛等^[32]针对我国国情及水安全现状,从延缓气候变干和提高人类自身应对干旱的能力两个角度出发,对中国水安全对策进行初步探讨;夏军等^[13]总结提出气候变化与水循环是国际全球变化与水科学领域的重大交叉前沿科学问题之一,水资源脆弱性已成为应对气候变化、保障水安全重点关注的问题;王小军等^[33]结合国内外水资源管理现状,提出对农业用水需求总量、用水效率进行调控的需水管理措施,从调控需求、提高效率的角度缓解供需矛盾,应对气候变化对农业用水安全的影响。这些针对变化环境下的水安全问题的研究与实践,将进一步提升我国对气候变化影响下中国水安全新的认识,为应对气候变化的适应性管理,提供更为扎实的科学技术支撑与决策支持。

4 中国水安全研究面临的机遇与挑战

节约水资源、保障水安全,事关“四个全面”战略布局,事关民族永续发展,事关国家长治久安。国家从战略和全局高度明确提出“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水新思路。为保障我国水资源可持续利用,国务院印发《水污染防治行动计划》(“水十条”)强调节约保护水资源主要从控制用水总量和提高用水效率两方面着手。在水资源开发利用空间愈来愈小的情势下,如何破解中国的水安全问题,支撑国家经济新常态的发展,成为我国可持续发展面临的重大水战略问题。

我国正面临变化环境下水资源供需矛盾日趋严峻、水污染普遍蔓延、水生态持续退化、水旱灾害频发、水管理体制不顺和机制不活等新老并存的多重水问题与危机。水安全问题和风险十分突出,成为影响经济可持续发展和人民安居乐业的关键性瓶颈制约,也因此越来越受到专家学者和国际国内组织的高度重视。中国水安全研究正面临着几个重要的机遇与挑战。

4.1 加强水文科学研究与投入 目前的陆地水系统及水资源观测分散在各个有关部门和行业,缺乏统一的陆地水系统和水资源变化的监测、水危机的预警预报及风险管理系统,不能满足我国和重点区域水安全保障的基础信息支撑与预警预报要求。与传统的工程水文学不同,气候变化下陆地水循环响应及气候变化对水资源的影响研究具有很大的挑战性。气候变化挑战传统假定,即过去的水文经验应用到未来的状况,水文特征很可能会发生变化。气候变化的负面影响将可能导致更多的水旱灾害、水短缺和水环境恶化的风险。现有的水资源规划大多是由部门制定的开发利用规划,缺乏适应变化环境的水安全保障的长远战略规划。水利水电建设,特别是跨流域调水等特大型工程,对大尺度的水循环系统及自然生态系统产生极大的扰动,天然水循环规律有很大的改变,其中许多科学问题需要深入研究,一些深层次的影响和后果亟待科学论证。这些方面的基础研究比较薄弱,投资和支持不够,重大水利水电工程的科学论证亦不足。

因此,要加强对重大水安全问题的科学研究。例如,变化环境下的陆地水循环规律、我国水文科学与水安全科学前沿问题、我国及其重点区域社会经济发展的需水规律与需水预测、水安全观察与战略研究等,建议加强对重大水问题科学研究的投入和政策支持,对重大水利水电工程,特别是大范围跨流域调水以及对水资源及环境影响巨大的大型工程,除了坚持做好环境影响评价等工作外,应打破部门限制,组织多学科交叉研究。

4.2 加强全球气候变化影响与对策研究 以全球变暖为主要特征的全球环境变化已经对生态系统和社会系统造成了严重的影响,并成为地学、环境学、生物化学、经济学等多学科融合的重要课题,受到了国际社会的普遍关注。目前,全球气候变化问题已经超出一般的环境或气候领域,而且涉及能源、经济和政治等方面。气候变化对我国陆地水循环及水资源的影响具有复杂性和不确定性。在已经发生和观测到降水、蒸发和径流等水文序列过程及其空间分布的变化中,既有自然变率的影响,又有人类活动包括温室气体排放和下垫面变化的影响。长期以来,由于气候-水文过程的复杂性

和尺度问题，气候变化影响下陆地水循环响应和气候变化对水资源影响的研究，主要采取的是“大气环流变化-区域降水变化-陆地/流域水文变化”单一方向的联系途径，缺少圈层之间水文与气候相互作用机理研究，导致对气候变化条件下的陆地水循环响应机理认识的不足。未来气候变化极有可能对我国水资源宏观配置的体系，包括对南水北调重大调水工程产生显著的影响；增加我国水旱灾害发生的频率与强度，降低现有的防洪安全标准和水安全体系，加大水资源脆弱性，影响我国农业、经济社会发展和水生态安全。

因此揭示气候变化和下垫面改变的影响及其驱动机制；发展气候变化多模式情景水文预估的不确定性理论与方法；预测和评估未来气候变化对我国水资源的影响；揭示不同气候和自然地理分区的“气候-水-人类活动”之间的相互作用机理，水文变化与人类活动的内在联系及其对气候变化的响应；研究气候变化影响下水资源系统的脆弱性和可持续性；揭示气候变化背景下水资源影响与经济社会相互耦合关系；丰富和发展适合我国国情的应对气候变化影响的水资源适应性管理与对策体系，是应对气候变化不利影响，保障变化环境下我国水安全的重要科学基础。

4.3 加强国家全社会节水战略研究 我国水资源严重短缺，同时用水浪费、效率不高和管理体制不足的问题较为普遍。长期以来，应对我国水短缺和水资源危机的首选途径是：以水利工程建设为中心，通过调水与供水途径开辟新水源，以满足社会经济的需求。但是，我国水资源的供给总是赶不上社会经济发展的变化。老的水短缺问题解决了，新的水危机很快又再生。由于全球变化影响和社会经济的发展，2050年我国人口预计达到16亿，而我国农业、工业、生活的需水和用水的传统模式，将带来十分严峻的水危机和水资源安全问题。

从全球保障水安全和遏制水危机的经验与教训来看，全社会节水战略是中国可持续发展、水资源可持续利用和生态文明建设根本途径。节水战略是指从国家水安全战略角度考虑，实现农业、工业、城镇节水和生活节水并重，满足国家战略水安全，确保我国未来用水不仅维持“零”增长，而且要做到“负增长”的国家综合节水战略。它以科技节水为创新驱动，以制度建设为契机，以水管理体制为保障，减少水危机的风险，减低水治理的成本，促进节水优先的社会风尚和理念，建立精心用水和管水的激励机制。它有两个突出的特色和特征：其一，节水不只是部门、行业行为，而是一个全社会的自觉行为；其二，全社会节水战略需要与国家发展经济布局、战略规划紧密结合，与供水、环保政府部门配合。在应对中国水危机的对策方面，应该上升到国家水战略。最近国家及相关部门即将启动过去有很好基础并在未来有更大发展的节水型社会建设“十三五”规划，必将有力推动中国的全社会节水战略研究，减少水资源安全面临的风险。

4.4 加强水治理的体制与制度创新研究，保障水资源安全 近20多年来，各行业包括农业、城市、工业和生活等已经实施多项水治理措施。水利部十年前提出节水型社会建设，农业部提出农业节水，住房建设部提出城镇节水、环境保护部提出污水处理等的确取得了较好的推进与成效。但是，就国家水战略层面看，由于行业管理和制度创新的缺失，到目前远远未达到“真实”水治理的目标和阶段。目前在水治理方面缺乏国家层面有效的统一和协调机制，条块分割，多龙治水，利益冲突，体制和机制亟待创新。在应对水危机的国家“十三五重大计划”、《水污染防治行动计划》和未来20~50年关键的发展期，特别需要强调将现行各个行业水治理措施有机地联系和组织起来，在国家层面将水治理作为一种战略，这是解决中国水危机根本问题的“水的革命”。

当前面临的重要挑战之一与核心是制度建设。以环保部牵头编制和国务院2015年4月16日印发的《水污染防治行动计划》为契机，通过大规模的制度建设，降低水治理的各种成本，建立促进节水和精心用水管水的激励机制。水治理的制度建设要比调水工程经济成本低得多，社会收益和效益高得多，这也正是制度建设最主要的节约作用。

由于变化环境下的水安全涉及多个方面，本文只是侧重全球变化与影响的水安全问题，做了比较粗浅的分析与总结，肯定有不少疏漏和错误，请指正和研讨。

致谢：本文综述引用了不少公开发表的国内外文献，对这些作者们为本文综述的观点的支撑与贡献表示感谢！本文得到国家自然科学基金项目(41571028, 51279140)资助，也一并致谢！

参 考 文 献：

- [1] Cook C, Bakker K . Water security: Emerging debates in policy and academia[R] . Working Paper, University of British Columbia, Programme on Water Governance, 2010 .
- [2] Global Water Partnership . Towards Water Security: A Framework for Action[Z] . Global Water Partnership, Stockholm, Sweden, 2000 .
- [3] World Economic Forum . At its Summit on the Global Agenda in Dubai in November 2008 the Network of Global Agenda Councils of the World Economic Forum discussed water security extensively[Z] . World Economic Forum Network of Global Agenda Councils, 2008 .
- [4] Falkenmark M . No Freshwater Security without Major Shift in Thinking: Ten-year Message from the Stockholm Water Symposia[M] . Stockholm International Water Institute, 2000 .
- [5] United Nations Environment Program . Water Security and Ecosystem Services: The Critical Connection[Z] . UNEP, Nairobi, 2009 .
- [6] 洪阳 . 中国21世纪的水安全[J] . 环境保护, 1999(10): 29-31 .
- [7] 夏军, 石卫, 雒新萍, 等 . 气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J] . 水科学进展, 2015, 26(2): 279-286 .
- [8] John W, John K, Masahiro M, et al . Core and Periphery: A Comprehensive Approach to Middle Eastern Water [M] . London: Oxford University Press, 1997 .
- [9] Martin S . The Politics of Water in the Middle East: An Israeli Perspective on the Hydro-Political Aspects of the Conflict[M] . New York: St . Martin's Press, 1999: 192 .
- [10] Benedito B, Colin C, Xia J (in alphabetic order), et al . Water and the Future of Humanity: Revisiting Water Security[Z] . Gulbenkian Think Tank on Water and the Future of Humanity, Springer (ISBN 978-3-319-01456-2), Springer New Work Heidelberg Dordrecht London, 2013 .
- [11] MaCarthy J J, Canziani O F, Leary N A, et al . Impacts, adaptation, and vulnerability[C]//IPCC Climate Change 2001 . Cambridge: Cambridge University Press, 2001 .
- [12] 夏军, 陈俊旭, 翁建武, 等 . 气候变化背景下水资源脆弱性研究与展望[J] . 气候变化研究进展, 2012, 8(6): 391-396 .
- [13] 夏军, 刘春蓁, 任国玉 . 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J] . 地球科学进展, 2011, 26(1): 1-12 .
- [14] Grey D, Garrick D, Blackmore D, et al . Water security in one blue planet: twenty-first century policy challenges for science[J] . Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2013, 371(2002): 20120406 .
- [15] Falkenmark M, Widstrand C . Population and water resources: a delicate balance[J] . Population bulletin, 1992, 47(3): 1-36 .
- [16] Raskin P, Gleick P, Kirshen P, et al . Water Futures: Assessment of Long-Range Patterns and Problems . Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World[M] . Stockholm Sweden Stockholm Environment Institute, 1997 .
- [17] Alcamo J, Döll P, Kaspar F, et al . Global change and global scenarios of water use and availability: an application of WaterGAP 1.0[R] . Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Kassel, Germany, 1997 .
- [18] Crisologo J . California implements water security and emergency preparedness, response, and recovery initiatives [J] . Journal American Water Works Association, 2008, 100: 30 .
- [19] Witter S G, Whiteford S . Water security: the issues and policy challenges[J] . International Review of Comparative Public Policy, 1999, 11: 1-25 .
- [20] Ashton P J . Avoiding conflicts over Africa's water resources[J] . AMBIO: A Journal of the Human Environment,

- 2002, 31(3): 236-242.
- [21] Shiklomanov I A, Rodda J C. World water resources at the beginning of the twenty-first century[M]. Cambridge University Press, 2004.
 - [22] Tamas P. Water resource scarcity and conflict: Review of applicable indicators and systems of reference[M]. UNESCO, 2003.
 - [23] 夏军, 朱一中. 水安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262-269.
 - [24] 程国栋. 虚拟水——中国水资源安全战略的新思路[J]. 中国科学院院刊, 2003, 18(4): 260-265.
 - [25] 畅明琦, 刘俊萍. 论中国水资源安全的形势[J]. 生产力研究, 2006(8): 5-7.
 - [26] Ouyang Z Y, Zhao T Q, Wang R S, et al. Scenario simulation of water security in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(5): 765-769.
 - [27] Döll P, Kaspar F, Lehner B. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 270(1): 105-134.
 - [28] Global Water System Project. Framing Committee, Alcamo J. The Global Water System Project: Science, Frameworks and Implementation Activities[M]. Global Water System Project, 2005.
 - [29] 张建云, 王国庆, 杨扬, 等. 气候变化对中国水安全的影响研究[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5): 290-295.
 - [30] 矫勇. 气候变化与我国水安全——流域综合规划修编中应考虑的气候变化问题[J]. 中国水利, 2008(2): 10-13.
 - [31] 刘昌明, 刘小莽, 郑红星. 气候变化对水文水资源影响问题的探讨[J]. 科学对社会的影响, 2008, 2: 21-27.
 - [32] 史正涛, 刘新有, 彭海英. 气候变化对中国水安全的挑战[J]. 云南师范大学学报: 哲学社会科学版, 2008, 40(2): 11-16.
 - [33] 王小军, 张建云, 王国庆, 等. 气候变化与农业用水安全[J]. 中国农村水利水电, 2012(2): 23-25.

Perspective on water security issue of changing environment in China

XIA Jun^{1, 2, 3}, SHI Wei^{1, 2, 3}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. The Research Institute for Water Security, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Hubei Provincial Collaborative Innovation center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China)

Abstract : Water security issue is not only an international hot topic, but also big challenges and problem of China on guaranteeing Chinese water security and realizing its sustainable development. This paper gives a definition of water security and addresses the important issue on new advantages of water security under a changing environment on both China and international, which includes water security assessment and new progresses of water security issue related to global change and its impact. It is emphasized on basic studies of hydrology and water resources related to climate change impact and water security issue, also interdisciplinary approach between natural sciences and social science, and water and the future of humanity. Some of suggestions and countermeasures are given as adaptive water management to changing environment.

Key words : water security; climate change; perspective; challenges; opportunity

(责任编辑: 韩 昆)